

Региональная геология

УДК 553.411

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ПРОГНОЗНО-МИНЕРАГЕНИЧЕСКИХ И ПОИСКОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА БЛАГОРОДНОМЕТАЛЛЬНОЕ ОРУДЕНЕНИЕ

А.Ф. Коробейников

Томский политехнический университет

E-mail: lev@tpu.ru

На основе концепции пульсационного геологического саморазвития Земли предложены новые модели возникновения и развития мантийных магмо-термофлюидодинамических и внутрикоровых гранитоидно-гидротермально-метасоматических рудообразующих систем при их пульсационно-эстафетном саморазвитии. Разработаны оптимальные варианты региональных и локальных прогнозно-поисковых критериев и признаков, а также типовых прогнозно-поисковых комплексов на комплексное благороднометалльное оруденение промышленного значения. Они включают прогнозно-минерагенические исследования рудоносных площадей на основе дистанционного и наземного методов физико-геологического и специального минералого-геохимического картирования в масштабах 1:200000–1:25000 (I этап); прогнозно-поисковые работы, включающие минералого-геохимическую специальную съемку в масштабах 1:50000–1:10000 (II этап); поисково-оценочные работы масштабов 1:10000–1:1000 (III этап).

Ключевые слова:

Рифтогенез, метасоматизм, рудообразование, мантийно-коровое взаимодействие рудообразующих систем, прогнозирование и поиски, комплексное оруденение.

Key words:

Rifting, metasomatism, ore formation, mantle-crust interaction of ore-forming systems, prediction and search, integrated mineralization.

Введение

Коллективом инновационного научно-образовательного центра «Золото-платина» ТПУ изучаются условия образования, размещения и разрабатываются новые методы и приемы прогнозирования и поисков месторождений благородных металлов. Первоначально (1960–1980 гг.) исследовались условия локализации и размещения месторождений золота в различных структурах земной коры, предлагались новые приемы их прогнозирования и поисков. Позднее исследования были направлены на разработку вопросов геохимии, генезиса, прогнозирования и поисков нетрадиционных комплексных золото-платиноидных руд в известных золоторудных регионах Сибири, Урала, Казахстана.

Результативность, эффективность и качество прогнозно-поисковых и разведочных работ на все виды полезных ископаемых во многом зависит от повышения уровня научного обоснования и геолого-экономической оценки выявляемых рудопоявлений и месторождений, от разработки и внедрения прогрессивных методов прогноза, повышения достоверности прогнозных построений. При всех видах, этапах и стадиях геологоразведочных работ, направленных на обнаружение промышленных месторождений полезных ископаемых, необходимо давать достоверную прогнозную оценку рудоносности изучаемых территорий в количе-

ственных показателях, а затем разрабатывать оправданный научный прогноз на поиски и оценку вновь выявляемых проявлений полезных ископаемых. Особое значение приобретает научно обоснованный выбор первоочередных крупных площадей и локальных рудоносных участков для постановки дальнейших геолого-съемочных, поисковых и оценочных работ.

Коллективом инновационного научно-образовательного центра ТПУ «Золото-платина» разрабатываются проблемы прогнозирования и поисков типовых и нетрадиционных месторождений благородных металлов. На основе принятой концепции пульсационного саморазвития Земли предлагаются новые модели возникновения и развития мантийной магмо-термофлюидодинамической и внутрикоровой гранитоидно-гидротермально-метасоматической рудообразующих систем (при пульсационно-эстафетном их саморазвитии), а также новые прогрессивные приемы и методы аналитических, прогнозно-минерагенических, поисковых исследований на золотое и комплексное золото-платиноидное оруденение.

Разрабатывались следующие разделы проблемы:

- Региональное минерагеническое прогнозирование рудоносных площадей.
- Факторы регионального прогнозирования.
- Принципы выделения рудоносных площадей.

- Локальное прогнозирование и поиски потенциальных месторождений и рудных полей.
- Поисковые критерии и признаки промышленного оруденения.
- Рудно-метасоматическая зональность как основа прогноза и поисков скрытого оруденения.
- Прогнозно-поисковые признаки промышленного золотого и комплексного золото-платиноидно-редкометалльного оруденения.
- Прогнозно-поисковые комплексы.

Методические основы исследований. Фактический материал получен при региональном дистанционном, наземном физико-геологическом и детальном геолого-минералого-геохимическом картировании рудоносных площадей с использованием дистанционных и наземных геолого-геофизических (ГСЗ, МОВЗ), геохимических исследований. Основное внимание уделялось расшифровке рудно-метасоматической зональности и разработке критериев и признаков оценки золотого и комплексного золото-платиноидного оруденения на глубину и фланги рудоносных структур. Геолого-минералогическое, геофизическое и геохимическое наземное картирование проводилось в масштабах 1:50000–1:1000. Специальным минералого-геохимическим исследованиям подвергались различные рудно-метасоматические комплексы и тела многих рудных полей Сибири, Урала, Казахстана, Средней Азии, а также слагающие их минералы – амфиболы, гранаты, пироксены, кварцы, карбонаты, пирит, арсенопирит, халькопирит, блеклые руды, борниты, сульфосоли, теллуриды и другие. Изучались кристаллографические, физические, электрические, химические свойства минералов. Геохимические пробы анализировались спектрохимическим, полярографическим, атомно-абсорбционным, нейтронно-активационным, сцинтилляционно-эмиссионным, инверсионно-вольтамперометрическим, пробирным методами. Нейтронно-активационные, полярографические и инверсионно-вольтамперометрические методы и приемы анализов природного вещества были разработаны в геолого-аналитическом «Золото-платина» [1–8].

Особенности методики регионального геолого-геофизического и локального минералого-геохимического картирования рудоносных площадей и аналитических работ рассмотрена в ряде ранних публикаций [1–3].

Выявляемые при региональном и локальном картировании рудных полей и месторождений благородных металлов объемные геолого-геофизические, минералого-геохимические данные, обрабатывались с помощью пространственно-статистического анализа на ЭВМ. Они служили основой для построения моделей их полей.

Аэрокосмические и наземные глубинные геолого-геофизические исследования рудоносных территорий. Для познания глубинного строения рудоносных площадей использована дополнительная информация, получаемая при проведении аэрокосмофотографических и глубинных геофизических (глубин-

ного сейсмического зондирования ГСЗ и метода отраженных волн зондирования МОВЗ) исследований. Получены новые данные о крайне неоднородном строении низов земной коры и верхних блоков мантии, подстилающих территории рудоносных площадей. Эти выступающие глубинные неоднородности обусловлены появлением блоков разуплотненных пород благодаря процессам глубинного метасоматизма и гранитизации, происходивших при процессах плюмтектоники, рифтогенеза и глубинного мантийного метасоматизма. Выявлены региональные особенности внутреннего строения внутрикоровых и мантийных структурно-вещественных комплексов и их различие. Непосредственно под крупными рудоносными площадями фиксируются блоки – выступы существенно разуплотненных пород, представленных гранитизированными и метасоматически преобразованными образованиями. Именно геосолитонная природа плюмов, палеодиапиризма, глубинного метасоматизма проявляет периодически ритмические, электромагнитные и другие явления в недрах и позволяет понять природу возникавших рядовых, крупных и сверхкрупных рудных объектов в земной коре. Пространственное взаимодействие при совмещении глубинных и внутрикоровых рудообразующих систем обеспечивало формирование крупных и сверхкрупных рудных полей и месторождений в земной коре, образованных при распаде глубинных магмо-термофлюидных систем под воздействием смещения их с холодными местными трещинно-поровыми водами [1].

Типичными золоторудными (с платиноидами) объектами, сформированными в черносланцевых и иных толщах фанерозоя, являются крупнейшие и уникальные месторождения Сухой Лог, Бакырчик, Неждановское, Наталкинское, Майское, Олимпиадинское, Мурунтау, Кумтор, Воронцовское и другие [1–5]. В углеродистых минерализованных толщах складчатых поясов обособляются две формационные группы месторождений: золото-кварцево-березитовая жильно-штокверковая и золото-углеродисто-сульфидно-лиственитовая прожилково-вкрапленная. Они размещаются в дислоцированных и ливинитизированных углеродистых породах цеолитовой, пренит-пумпеллиитовой и зеленосланцевой фаций метаморфизма. Продуктивная на Au, Pt, Pd минерализация представлена пиритом, арсенопиритом, пирротинном, серицитом, карбонатами, прожилковым кварцем. Золото, платиноиды – свободные, дисперсные, ультрадисперсные в пирите, арсенопирите и углеродистом веществе (шунгите-антраксолите).

Рудоносные черносланцевые толщи размещаются в компенсационных прогибах, приуроченных к крупным рифтогенным разломам в куполах, горстах, грабенах складчатых и офиолитовых поясах, в надинтрузивных зонах [1]. Например, платиноносные золоторудные месторождения Западной Калбы (Бакырчик, Большевик, Боко-Васильевское и другие [2–5] размещаются в рифтогенной структуре Зайсанской склад-

чатой зоны они были сформированы в герцинский этап становления региона. Рудные поля и месторождения находятся в пределах Чарско-Горностаевского поднятия – Чарского офиолитового пояса в зонах активного проявления палеоопапиризма и глубинного метасоматизма. Они несут комплексное золотое (с Pt, Pd, Os, Ir) оруденение прожилково-вкрапленного и жильного типов и фиксируются дистанционными аэрокосмическими и наземными геолого-геофизическими методами в инъективно-магматических и метасоматических полях [2].

Сведения о глубинном строении региона приведены в публикациях Н.К. Булина, В.Н. Любецкого, Г.Н. Щербы, Б.А. Дьячкова, Г.П. Нахтигаль [4–8]. Данные получены по двум профилям МОВЗ и профилю СГЗ-МОВ Балхаш-Алтай, а также по результатам интерпретации гравитационных, магнитных полей и дешифрирования аэрокосмоснимков, анализа стратиграфических разрезов (рис. 1) [2]. Верхняя мантия залегает на глубинах 37...48 км, глубина её кромки увеличивается с северо-запада на юго-восток. В рельефе раздела Мохоровичича установлено поднятие, которое погружается с северо-запада на юго-восток. Ось этого поднятия проходит субпараллельно юго-западной границе Чарско-Горностаевского горста (Чарского офиолитового пояса). На глубинах 15...40 км выявлены «слепые» зоны для МОВЗ, отвечающие блокам развития гранитоидов. Сейсмическими работами установлены субвертикальные глубинные зоны, соответствующие глубинным разломам. Большой протяженностью по вертикали отличается глубинный разлом,

связанный с Кызыловской зоной смятия, контролирующей крупное Бакырчикское золоторудное поле. Эта зона проявлена в рельефе поверхности Мохоровичича в виде ступени с амплитудой 3...4 км на глубинах 30...40 км. Чарская и Калба-Нарымская структурно-фациальные зоны отличаются пониженными глубинами залегания мантии до границы Мох в 43...45 км. Это свидетельствует о приподнятом блоке верхней мантии. Н.К. Булин отмечает, что по сейсмическим данным верхняя мантия под Чарско-Горностаевским поднятием была активизирована до 300 км, а под Жарминским прогибом – до 220 км, что нашло отражение в локальных изменениях границ обмена [4].

Мантийно-коровые рудообразующие системы:

магматизм, метасоматизм и золото, золото-платиноидное оруденение.

Критерии прогнозирования золотого и комплексного золото-платиноидного оруденения

Глубинный метасоматизм и заложение рудообразующих систем. Установлен вынос золота при метасоматическом преобразовании глубинных гранатовых перидотитов, зафиксированный в ксенолитах измененных перидотитов в кимберлитах Сибирской платформы: содержание Au сокращается вдвое $K_H^{Au}=0,5$ по сравнению с исходными породами, а также в перекристаллизованных гранатах. Дополнительным доказательством фракционирования золота в мантийных условиях служат примеры крайне неоднородного его распределения в гипербазитах и базитах – от 0,5 до 47 мг/т (рис. 2) [7, 8].

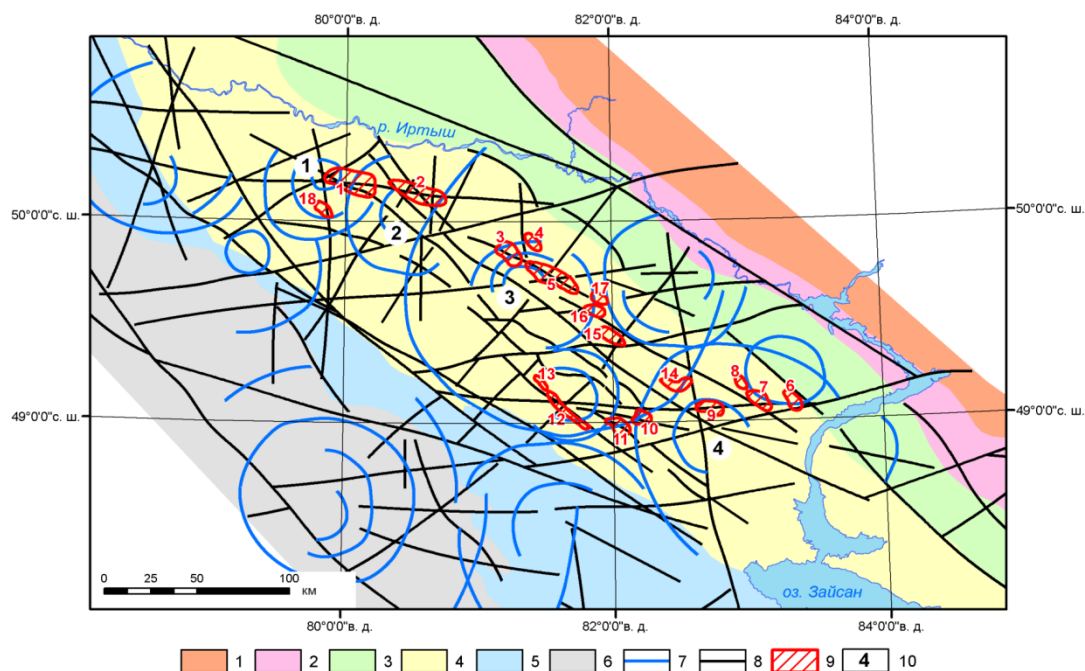


Рис. 1. Космоструктурная модель Западно-Калбинской металлогенической зоны и сопредельных территорий (по результатам дешифрирования космических снимков Modis). 1–5 – металлогенические зоны Зайсанской складчатой системы: 1) Рудно-Алтайская; 2) Иртышская; 3) Калба-Нарымская; 4) Западно-Калбинская; 5) Жарма-Саурская; 6) Чингиз-Тарбогатайские каледонские структуры обрамления; 7) частные кольцевые структуры; 8) частные линейменты; 9) рудные поля; 10) очаговые структуры: Джерек-Суздальская (1), Кедейская (2), Кызыловская (3), Джумбинская (4)

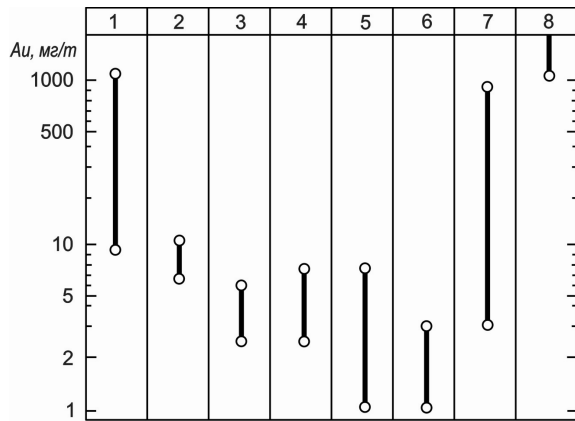


Рис. 2. Распределение средних содержаний золота в глубинных и коровых образованиях Земли: 1) хондриты, железные метеориты; 2) ультрабазиты и базиты мантийные во включениях в кимберлитах, альнеитах; 3) продукты мантийного метасоматоза во включениях в кимберлитах; 4) ультрабазиты и базиты коровые; 5) гранитоиды коровые; 6) продукты корового щелочного метасоматизма (альбититы, калишпатиты); 7) продукты локального околорудного метасоматизма (грейзены, листвениты-березиты, гумбеиты, аргиллизиты); 8) рудные ассоциации

Внутрикоровый магматизм, метасоматизм и оруденение [1, 7, 8]. Минералого-геохимические показатели продуктивных и безрудных базитовых и гранитоидных интрузий формаций дунит-пироксенит-габбровой, габбро-диорит-диабазовой, габбро-плагιοгранитной, габбро-диорит-гранодиоритовой, пестрых батолитов. Для продуктивных гранитоидных интрузий складчатых поясов фанерозоя свойственны:

1) Признаки двух-трехстадийного формирования отдельных интрузивных фаз — габбро, диоритов, гранодиоритов I фазы; гранодиоритов, плагιοгранитов II фазы; гранитов, граносиенитов III фазы.

2) Повышенная основность пород, преобладание Na над K на 0,5...1,5 %, Cl над F во флюидной фазе (2...50 раз); явления щелочного автометасоматоза-калишпатизации, альбитизации, биотитизации в апикальных частях интрузивов; развитие пород двух петрохимических рядов-диоритов и плагιοгранитов и автометасоматитов — магнезиальных и известковых скарнов, альбититов-калишпатитов, березитов-лиственитов и аргиллизитов.

3) Признаки глубинных трансмагматических флюидов, выявляемые в форме флюидных включений в минералах магматитов и автометасоматитов с высокими концентрациями газов восстановительной обстановки CO, CO₂, CH₄, H₂, C₂ H₂, Cl, F, P, а также по наличию самородных элементов C, Cu, Pb, Zn, Sn, Au, Ag, Pt, карбидов F₃C, SiC среди аксессуарных минералов; по развитию ореолов повышенной золотоносности контактовых роговиков и мраморов ($K_H^{Au}=1,2...1,3$); по золотосодержащим расплавно-рассольным включениям в шпинелях скарнов, $(1...9,8) \cdot 10^{-6}$ моль/л Au.

4) Связь дайкообразования диабазов, диорит-лампрофиров, порфириров с золотом, золото-платиноидным оруденением: развиты до-, внутри- и по-

слерудные дайки. Руды локализовались в «головках» свит даек или рудные столбы тяготеют к участкам повышенной плотности дайковых тел. В таких дайковых телах отмечается обычно вдвое повышенное содержание золота. В сложнозональных дайковых телах долерит-диабазов, лампрофиров, сформированных трех-шестикратным внедрением расплава из промежуточных очагов-камер, установлено 2...3-кратное накопление Au в поздних дифференциантах — $K_H^{Au}=1,8...7,5$. Повышение концентрации серы в расплавах приводило к накоплению халькофильных элементов и золота в магматитах.

5) Установлены показатели распределения золота в породах и минералах продуктивных интрузий: $\bar{X}_{Au}=3,6...6$ мг/т, $V_{Au} \geq 80$ %, $K_H^{Au}=2...3$ и $\bar{X}_{Au}=5...30$ мг/т, $V_{Au} \geq 100$ %, $K_H^{Au}=8...57$ для контактовых метасоматитов; для безрудных интрузий эти показатели отвечают $\bar{X}_{Au}=0,8...1,8$ мг/т, $V_{Au} \leq 70$ %, $K_H^{Au}=1...1,7$ и $\bar{X}_{Au}=3...6$ мг/т, $V_{Au} \geq 80$ %, $K_H^{Au}=1...4$ в скарнах. В целом разновозрастные гранитоиды золотоносных районов несут умеренно повышенные параметры распределения Au: 2,7...4,8 мг/т и повышенные параметры K_H и V . Основными минералами-носителями Au служат минералы интрузивов, а концентраторами — акцессории, K_H^{Au} в которых достигает 10...1000. Параметры распределения элементов-спутников As, Sb, Cu, Pb, Zn, Ag, Bi, Ga также возрастают до $K_H > 3$, $V \geq 100$. Акцессорные сфен, апатит, циркон, магнетит продуктивных интрузий обычно несут 7...1880 мг/т Au: $K_H^{Au}=5,4...41$ (рис. 3). Диаграмма составлена по данным анализов 3500 проб из пород и минералов

6) Установлено фракционирование золота в магматических расплавах при их кристаллизации: зафиксированное накопление его в цементирующей основной мелкозернистой массе пород по сравнению с протобластами — $K_H^{Au}=2,1...12$ для гранитоидов и 10...41 для щелочных пород. Определено накопление Au в остаточных расплавах габбро-гранитных интрузий ($K_H^{Au} 1,1...2,7$) и особенно во флюидах области субсолидуса ($K_H^{Au} 53...300$).

7) Установлено перераспределение и вынос золота при площадном щелочном автометасоматозе интрузивов до 40...50 % в зонах альбитизации, калишпатизации — 2...3 вместо 3,6...6 мг/т. Формирование околорудных грейзенов, березитов-лиственитов, аргиллизитов напротив сопровождалось накоплением Au и Pt, Pd, Rh до $K_H^{Au}=50...300$ и $K_H^{Pt}=410...600$. Максимальные концентрации благородных металлов выявлены в окварцованных и сульфидизированных породах — $K_H^{Au}=300...1300$ и $K_H^{Pt} \geq 1500$ (рис. 4).

В газово-жидких включениях минералов скарнов и березитов-лиственитов выявлено содержание Au до $(1,2...30) \cdot 10^{-6}$ моль/л.

8) В магно-рудно-метасоматических колоннах золотое и комплексное золото-платиноидное оруденение размещается зонально: внизу скарны, альбит-калишпатовые, пропиловитовые, грейзеновые метасоматиты с вкрапленными золото-платино-вольфрам-молибденовыми рудами; в средней

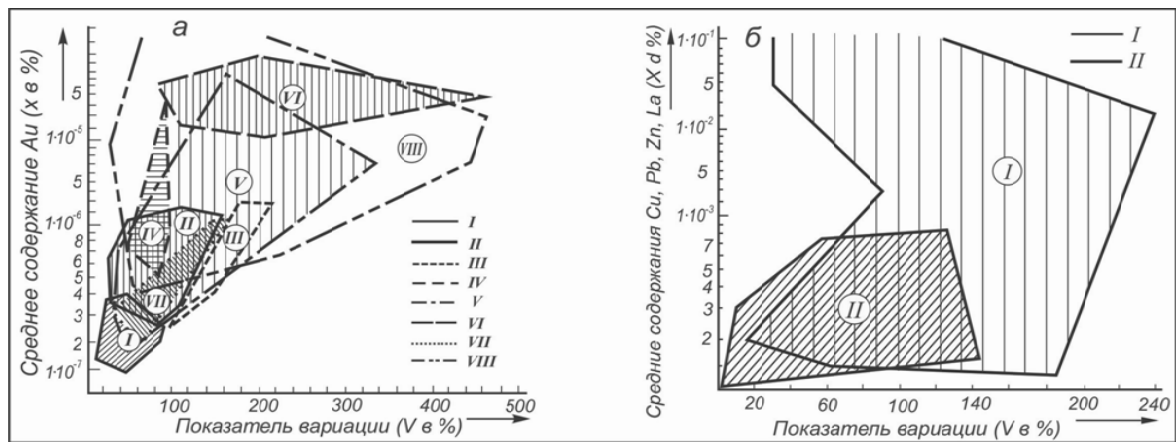


Рис. 3. Соотношение параметров распределения золота (X , V) (а) и Cu , Pb , Zn , Ga (б) в породах и минералах нижнепалеозойской гранитоидной формации Алтае-Саянской складчатой области. I-VIII - поля развития пород. I) гранитов Белоюсского, Тигертышского, Томского массивов; II) диоритов, сиенито-диоритов, монцонитов, гранодиоритов, плагиигранитов нижнепалеозойских массивов Кузнецкого Алатау, Восточного Саяна, Горной Шории, Горного Алтая, Тывы; III) даек диоритов, лампрофиров, диоритовых порфиров, сиенито-диоритов Солгонской интрузии; IV) магнезиальных скарнов гранитоидных интрузий Ольховского, Тарданского рудных районов Восточного Саяна и Тывы; V) известковых скарнов, VI) скарново-золото-магнетитовых руд, послескарновых метасоматитов тех же регионов; VII) скарново-магнетитовых руд железорудных месторождений Алтае-Саянской складчатой области; VIII) околорудных березитов, листвени-тов, альбититов, гумбеитов, серицитовых метасоматитов скарново-золоторудных и кварцево-золоторудных полей

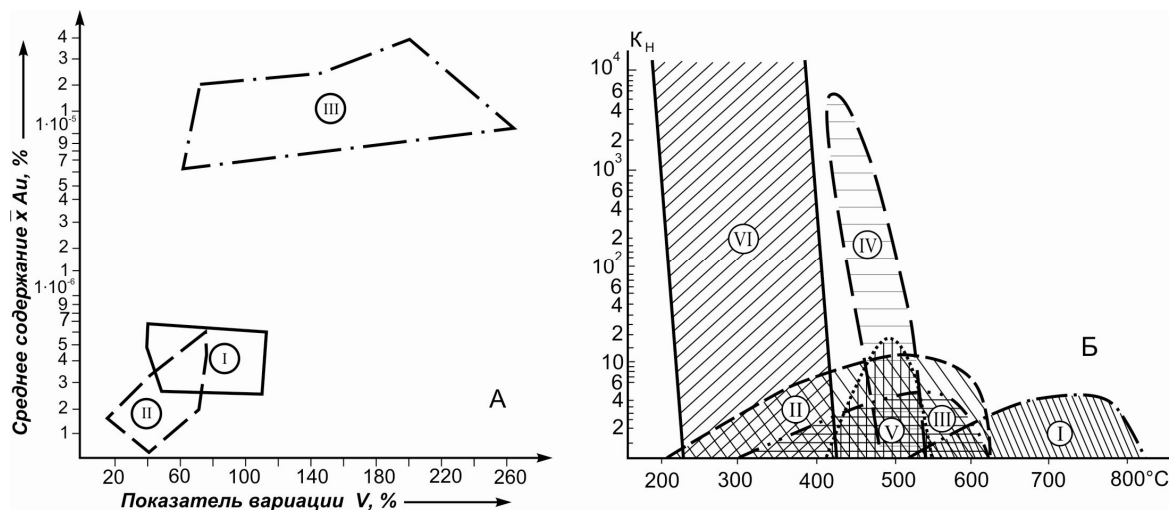


Рис. 4. А. Соотношение параметров распределения золота \bar{X} и V (средних содержаний и показателя вариации) в исходных и измененных гранитоидах интрузивов Восточного Саяна, Тывы, Кузнецкого Алатау (по А. Ф. Коробейникову): I - поле развития минералов и пород неизмененных гранитоидов; II - то же, калишпатизированных и альбитизированных гранитоидов; III - то же, грейзенизированных, березитизированных гранитоидов. Б. Диаграмма соотношений коэффициента накопления золота (K_n) в минералах контактово-метасоматических зон гранитоидных и трапповых интрузий и температур их формирования (по гомогенизации включений): I-VI) поля развития минералов: I) магнезиальных скарнов гранитоидных интрузий Алтае-Саяна и Тянь-Шаня; II) известковых скарнов тех же регионов; III) известковых скарнов трапповых интрузий Сибирской платформы; IV) скарново-магнетитовых руд нижнепалеозойской гранитоидной интрузии Алтае-Саяна (первый максимум бедной золото-серебряной минерализации в зонах сульфидизированных магнетитов); V) золотосодержащих скарново-магнетитовых руд Кузнецкого Алатау, Горной Шории (второй максимум промышленной концентрации Au (Калиостровское, Казское, Сухаринское месторождения); VI) минералы золото-теллуридно-сульфидных руд в скарновых зонах нижнепалеозойской и верхнепалеозойской гранитоидных интрузий Алтае-Саяна, Тянь-Шаня (основной промышленный максимум накопления Au) (Синюхинское, Ольховское, Тарданское, Куру-Тегерекское, Тарорское, Гишдарвинское месторождения)

части березиты, листвени-ты со штокверковой золото-платино-висмут-теллуридной минерализацией; вверху - листвени-ты или аргиллизиты с жильными золото-палладий-сульфосо-льно-теллуридными ассоциациями (рис. 5). В сульфидизированных скарнах концентрация Au и Pt достигает

3...30 г/т, 1...7,2 г/т соответственно; в альбит-ка-лишпатитовых, грейзеновых ассоциациях до 1...5 г/т Au, 0,1...1,3 г/т Pt, Os; в березитах, листвени-тах, аргиллизитах с мышьяково-сульфидными, висмут-теллуридными комплексами до 1...10 г/т Au, 1...9,3 г/т Pt, Pd (рис. 5).

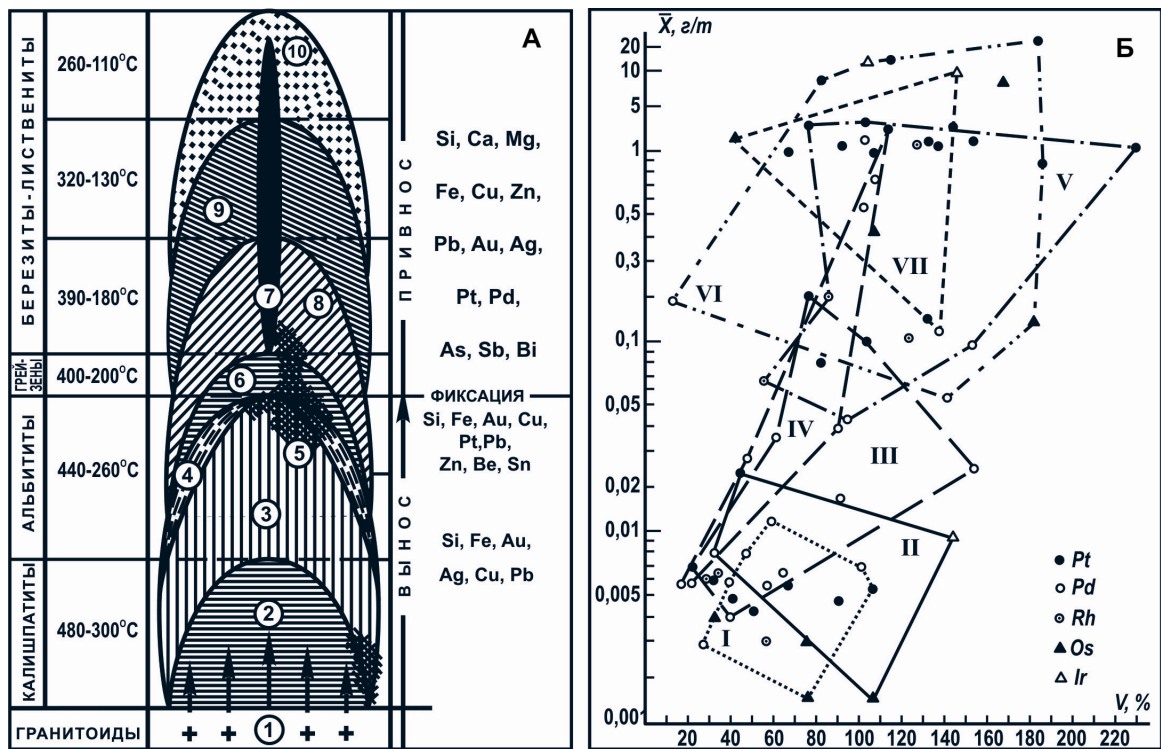


Рис. 5. А. Модель рудно-метасоматической зональности золоторудных полей складчатых поясов (по А.Ф. Коробейникову): 1) диориты-плаггиограниты; 2) калишпатизированные габброиды и гранитоиды; 3) альбитизированные габброиды и гранитоиды; 4) биотитизированные породы; 5) вкрапленные золото-редкометалльные руды в альбититах; 6) грейзе-ны; 7) кварцево-золото-платино-сульфидные жильные руды в березитах-лиственитах; 8) гидробиотит-тремолитовые, хлоритовые метасоматиты; 9) кварц-серицит-пирит-карбонатные метасоматиты; 10) доломит-кальцитовые метасоматиты. Б. Диаграмма соотношений средних содержаний ЭПГ \bar{X} и показателя вариации V ЭПГ в горных породах и рудах золоторудных полей Сибири и СВ Казахстана: I-VII – поля распространения пород и руд с неодинаковым распределением Pt, Pd, Rh, Os, Ir: I – поле $\bar{X}_{Pt, Pd, Rh}$ и $V_{Pt, Pd, Rh}$ в углеродистых аргиллитах, алевролитах, песчаниках, сланцах Сухоложского, Саралинского, Олимпиадинского, Воронцовского, Бакырчикского, Боко-Васильевского, Костобе-Эспинского рудных полей; II – то же для Pt, Pd, Ir серпентинизированных гипербазитов Саралинского, Октябрьского, Боко-Васильевского рудных полей; III – то же, для березитов-лиственитов тех же рудных полей; IV – то же, для Pt, Pd штокверково-кварцевых руд Коммунарковского, Советского рудных полей; V – то же, для Pt, Pd кварцево-жильных руд Коммунарковского, Советского, Зун-Холбинского, Ирокиндинского рудных полей; VI – то же, для Pt, Pd, Ir, Os, Rh вкрапленных золото-сульфидных руд в листенитизированных углеродистых сланцах, песчаниках, эффузивах, туфах Боко-Васильевского, Бакырчикского, Воронцовского, Олимпиадинского, Акжальского, Зун-Холбинского золоторудных полей; VII – то же, для Pt, Pd, Os, Ir для сульфидизированных серпентинитов-лиственитов апогипербазитовых Октябрьского, Боко-Васильевского рудных полей

Общая вертикальная протяженность рудно-метасоматических колонн достигает 1,2...3,8 км. В этих колоннах установлено одно-двухволновое размещение богатой рудной минерализации (рудных столбов) в вертикальных диапазонах 240...400, 400...600 и 800...1200 м. Минимальная вертикальная протяженность рудных столбов свойственна близповерхностным месторождениям, а максимальная – среднеглубинным.

9) В контактовых метасоматитах продуктивных и безрудных интрузий золото содержится в количествах, превышающих в 2...3 раза содержание его в интрузивных породах. В минералах магнезиальных скарнов, возникавших в процессе магматического замещения доломитов, установлено 4...114-кратное возрастание содержаний Au по сравнению с минералами гранитоидов и доломитов. Известковые скарны, возникавшие в послемагматический этап контактового метасоматоза,

также характеризуются 1,3...57-кратным повышенным содержанием Au по сравнению с гранитоидами и известняками: $\bar{X}_{Au} \geq 18,5$ мг/т. В послескарновых актинолит-хлорит-кварц-карбонатных метасоматитах отмечается высокая концентрация Au до 0,1...3 г/т: $K_H \geq 5...300$, $V_{Au} \geq 100...125$ %. Следовательно, в период контактового метасоматоза происходит привнос Au, ЭПГ со стороны интрузий с максимумом их концентрации до 9...30 г/т, $V \geq 125...300$ %, K_H 300...1500 в заключительную стадию окварцевания и сульфидизации (рис. 4).

10) Выявлены признаки фракционирования золота между твердой и жидкой фазами кристаллизующихся расплавов: $K_H^{Au} = 1:3...21$ и $1:53...114$, а также между твердой и флюидной фазами области субсолидуса: K_H^{Au} 1:5,5 и 1:290. Коэффициенты распределения золота K_H^{Au} между магмой, кристаллизатом и флюидной фазой составили 1,3:1,3 в начальную стадию раскристаллизации расплавов

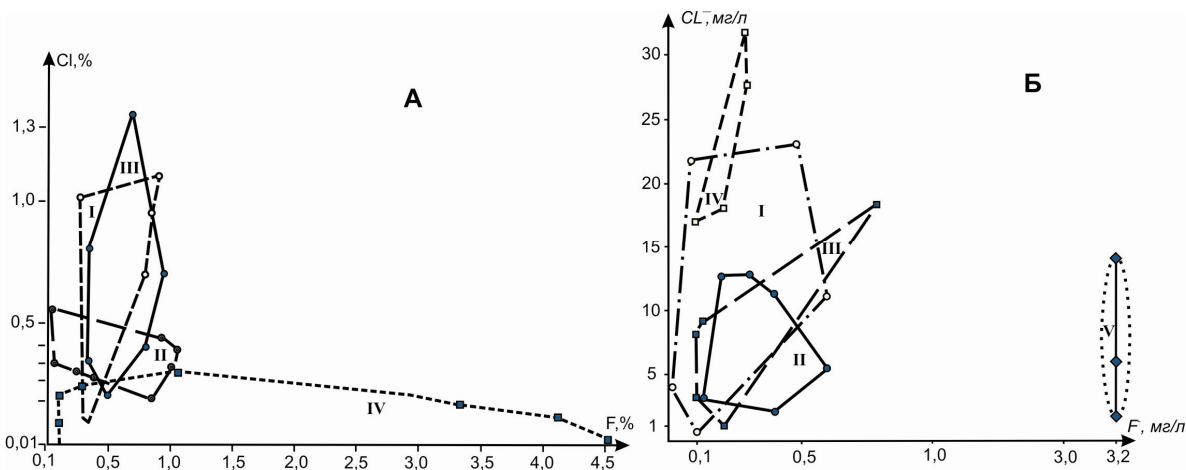


Рис. 6. А. Соотношение содержаний Cl и F в биотитах гранитоидов кварцево-золоторудных (поле I на графике), золоторудных участков Кураминского региона Тянь-Шаня (поле II на графике); золото-скарновых (поле III на графике) и медно-молибден-порфировых (поле IV на графике) месторождений Алтае-Саянской, Забайкальской складчатых областей. Б. Соотношение ионов Cl к F газовой-жидких включений в минералах скарнов (шпинель, фассаит, гранат, диопсид, геденбергит, везувиан, скополит, волластонит), березитов, гумбеитов, альбититов-калишпатитов (кварц, карбонаты) золоторудных, золото-медно-молибден-порфировых, золото-берилл-колумбит-касситеритовых месторождений по данным водных вытяжек: I) жильно-штокверковые, вкрапленные золоторудные (с сопутствующей Bi, Te, W минерализацией) месторождения (Любавинское, Коммунарское, Балахчинское, Константиновское, Ударное, Эльдорадинское, Чармитанское); II) золото-скарновые месторождения (Ольховское, Медвежье, Тарданское); III) золото-медно-порфировые месторождения (Каульдинское); IV) медно-молибденное с Au Кальмакырское месторождение; V) золото-берилл-колумбит-касситеритовое Кутурчинское месторождение

и 2,5:1:21 в конечную стадию для толейтовых магм, а для гранитоидных магм — 2:1:5 в начальную и 2,5:1:114 в заключительную стадию. Тем самым подтверждено накопление золота в остаточных расплавах и флюидах формирующихся продуктивных интрузий, в том числе в гранитоидах заключительных фаз интрузий и их дайковых комплексов ($K_{H}^{Au} 1,5...7,5$) (рис. 4, 5).

11) Геохимическими исследованиями установлено формирование комплексных золото-платиноидно-редкометалльных руд металлоносными флюидами с соотношениями Cl, F от 5:1 до 1,1:1, а для собственно золоторудных — Cl: F от 50 до 100:1 во флюидных фазах рудоформирующих интрузий (рис. 6). Отмечаются близкие соотношения в биотитах гранитоидов Cl: F от 1:1 до 1:30 для интрузий с комплексными месторождениями благородных и редких металлов, а для редкометалльных гранитоидных интрузий эти показатели превышают 1:30...1:60.

Выделены геохимические поля гранитоидов Беркульского, Федоровского, Центрального, Зун-Холбинского кварцево-золоторудных (поле I); Натальевского, Майского, Тарданского, Синюхинского, Ольховского, Ульменского, Чойского, Караминского золото-скарновых полей (поле III) Алтае-Саянской складчатой области; гранит-порфиров, сиенит-порфиров Уйбатского плутона Сорского, Аксугского, Жирекенского медно-молибден-порфировых месторождений Сибири и проявлений Станового хребта (поле IV).

12) Разработана такая последовательность геохимических событий при формировании эндогенных рудных месторождений:

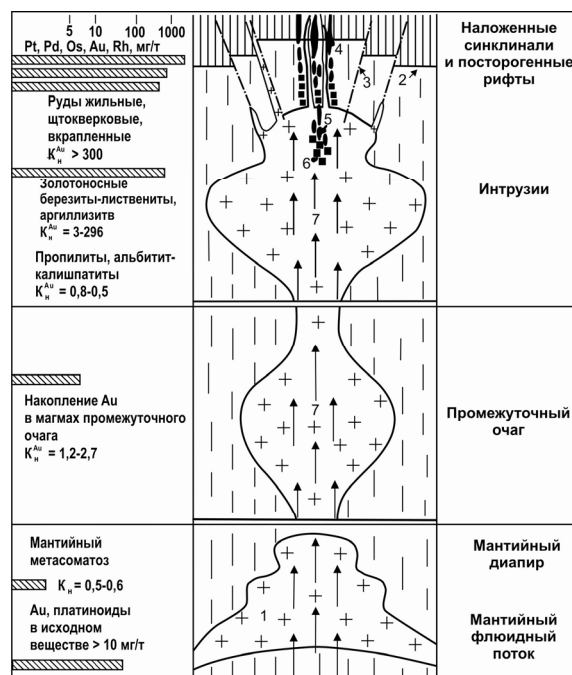


Рис. 7. Мантийно-коревая модель формирования золото-платиноидно-редкометалльных месторождений в черносланцевых толщах орогенно-рифтогенных структур протерозоя-фанерозоя: 1) гипербазит-базит-плагитогранитные интрузии; 2) компенсационные синклинали и посторогенные рифты; 3) региональные глубинные разломы; 4-6) руды: 4) жильные, 5) штокверковые; 6) вкрапленные; 7) флюидный мантийный поток

- мантийный метасоматизм глубинных опрод ($K_{H}^{Au}=0,5$) и формирование рудообразующих глубинных термофлюидных систем ($K_{H}^{Au}=115...1500$);

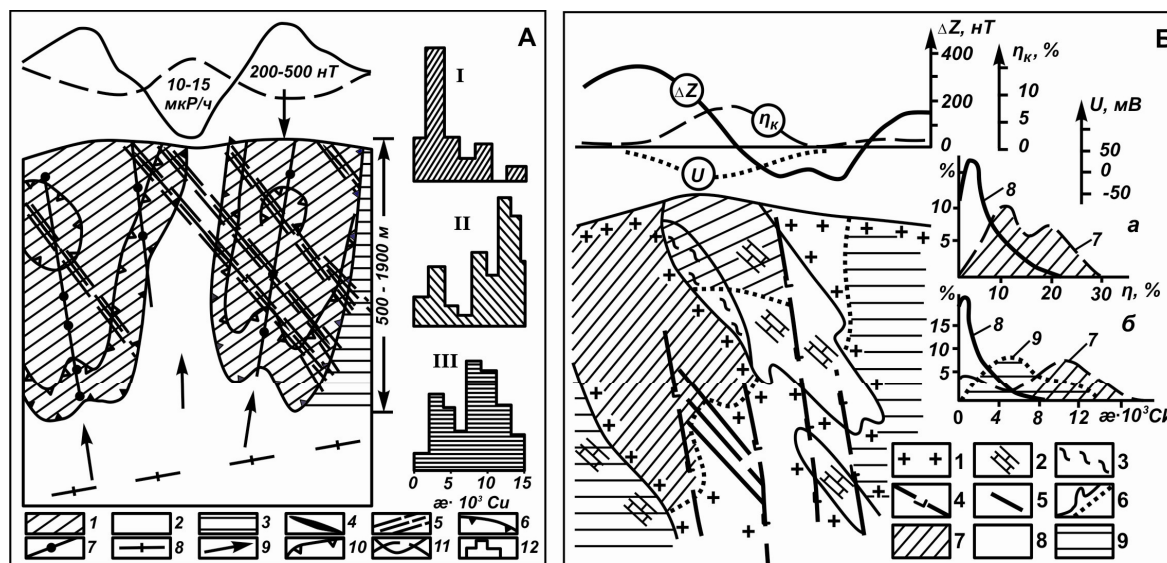


Рис. 8. А. Физико-геологическая модель месторождения золота в Центральнинском гранодиоритовом интрузиве Кузнецкого Алатау: 1-3 – гранодиориты: 1) повышено магнитные; 2) калишпатизированные пониженно магнитные; 3) умеренно магнитные за пределами рудных участков; 4) золотоносные кварцево-сульфидные жилы; 5) зоны безрезитизации; 6) границы развития золотопродуктивных рудных тел; 7) зоны локальной калишпатизации; 8) линия сопряжения с зоной повышенной флюидопроницаемости; 9) направления движения металлонесных растворов по зоне калишпатизации; 10) граница развития высокотемпературных шеелитовых парагенезисов в жилах; 11) графики радиоактивности (штриховая линия) и магнитного поля; 12) гистограммы магнитной восприимчивости гранодиоритов из зон пониженной (I), повышенной рудоносной (II) и умеренной (III) магнитности. Б. Физико-геологический разрез месторождения в гранитоидах восточной части Ольховско-Чибихевского рудного поля: 1) граниты, гранодиориты; 2) известняки; 3) рогавики; 4) дайки диоритовых порфиров; 5) кварцево-сульфидные золотоносные жилы; 6) границы петрографических (а) и петрофизических (б) разновидностей пород; 7) повышено-магнитные гранитоиды и графитизированные вмещающие породы; 8) пониженно-магнитные гранитоиды и мраморизованные, скарнированные вмещающие породы; 9) породы за пределами изменений; а-б – вариационные кривые вызванной поляризуемости известняков и рогавиков (а) и магнитной восприимчивости гранитоидов (б); приведены графики магнитного поля (ΔZ) естественной (U) и вызванной (ηK) электрических поляризаций

- становление гипербазит-базит-плагiogранитных интрузий с показателями $K_H^{Au}=0,8...0,6$ и $K_H^{Os}=0,5$;
- околорудный метасоматоз пород с $K_H^{Au}=3...300$ и $K_H^{Os}=36...410$;
- заключительное окварцевание, сульфидизация пород с $K_H^{Au}=300...1000$ и $K_H^{Os}=1050$.

Выделяются глубинные зоны ($\geq 60...80$ км), где преобладают процессы экстракции рудных элементов восходящими глубинными термофлюидопотоками ($K_H=0,5...0,6$) и области разгрузки металлонесных флюидов ($15...1$ км), где магмо-термофлюидодинамические системы отлагали их в зонах рудолокализации (рис. 7, 8).

Разработаны прогнозно-поисковые критерии и признаки золотого и комплексного золото-платиноидно-редкометалльного оруденения. Золотое, золото-платиноидно-редкометалльное оруденение формировалось в условиях совмещения в складчатых поясах разновозрастных последовательных процессов седиментации, дислокаций, метасоматизма, гипербазит-барит-плагiogранитного и гранитоидного магматизма, сопровождающего метасоматизма на участках проявления рифтогенеза и палеодиапиризма.

Разработаны региональные и локальные прогнозно-поисковые критерии и признаки, включа-

ющие черносланцевые толщи рифтогенного типа, прорванные штоками, дайками базит-плагiogранит-гранитного состава в офиолитовых и терригенно-вулканогенных поясах, террейнах, проявления мантийно-коровых палеодиапиров (пёстрые магматиты, метасоматиты в комплексационных рифтогенных синклиналях с черносланцевыми горизонтиками), наличие глубинных расколов земной коры и мантии; развитие малых и средних размеров кольцевых структур в сочетании с дугowymi, линейными региональными структурами, дешифрируемыми по аэрокосмическим снимкам и данным глубинной геофизики, в том числе сейсмической томографии; наличие региональных отрицательных и положительных гравимагнитных аномалий и геохимических полей и т. п.

Прогнозно-поисковые комплексы

Технология прогнозирования и поисков месторождений благородных металлов включала геологические, геофизические, геохимические исследования перспективных территорий в три этапа [9, 10].

I этап – прогноз региональных рудоносных площадей на основе анализа имеющихся геолого-геофизических (ГСЗ, МОБЗ), геохимических карт в масштабах 1:200000 (1:100000)–1:25000. Специальное картирование крупных метасоматиче-

ских зон с возможной золотой или комплексной золото-платиноидно-редкометалльной минерализацией. Специальные ревизионные минералогическо-геохимические исследования сульфидов, кварцев, карбонатов с определением элементов-спутников Ag, Bi, Te, Se, Tl, Re, Cu, Pb, Zn, As, Sb, Co, Ni, Hg, Ba, Ti, Cr, Mn, Be, Mo, W. Подсчет прогнозных ресурсов Р₃ в рудных зонах, узлах, полях.

II этап – поисковые работы, включающие минералогическо-геохимическую специальную съёмку рудоносных участков (потенциальных рудных полей) в масштабах 1:50000–1:10000.

Специальное минералогическое и петрофизическое картирование зон метасоматитов в масштабах 1:50000–1:5000. Высокоточная магнитометрия, ЕП, ВП, КС, радиометрия. Проведение структурно-поисковых единичных скважин глубиной 300...600 м с детальной скважинной геофизикой, геохимией, термобарогеохимией. Выделение перс-

пективных рудоносных участков с подсчетом прогнозных ресурсов категории Р₂.

III этап – оценочные работы на Au, Ag, Pt, Pd, Re на выявленных перспективных площадях, включающих геолого-минералогическое, геохимическое картирование рудоносных участков в масштабах 1:10000–1:1000. Бурение колонковых скважин по профилям через 500 м глубиной до 300 м. Скважинная геофизика, петрофизика (ВП, МЭК, МЭП, КСПК) и геохимическое опробование на Au, Ag, Pb, Si, Bi, Te, Se, Tl, Re, Pt, Pd, Rh, Os, Jr. Прогнозная оценка рудных зон с подсчетом прогнозных ресурсов категории Р₁, возможных запасов категории С₂. Составление ТЭЭС и ТЭЭО для дальнейшего изучения и освоения выявленного оруденения [9].

Работа выполнялась при финансовой поддержке РФФИ и Минобрнауки РФ, проекты 06–05–64091, 2006–РП–112.0/001/182, 2.318.2009.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коробейников А.Ф. Мантийно-коровые рудообразующие системы комплексных месторождений благородных и редких металлов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 130 с.
2. Коробейников А.Ф., Масленников В.В. Закономерности образования и размещения месторождений благородных металлов в черносланцевых толщах Северо-Восточного Казахстана. – Томск: Изд-во ТГУ, 1994. – 337 с.
3. Коробейников А.Ф. Нетрадиционные комплексные золото-платиноидные месторождения складчатых поясов. – Новосибирск: НИЦ ОИГГМ СО РАН, 1999. – 237 с.
4. Булин Н.К., Афанасьева Н.А., Поняева Е.А., Эрглис Е.И. Глубинное строение территории Юго-Западного Алтая по сейсмическим данным // Советская геология. – 1969. – № 4. – С. 97–109.
5. Любецкий В.Н. Глубинное строение и районирование Иртыш-Зайсанской складчатой системы по геофизическим данным // Известия вузов. Геология и разведка. – 1965. – № 12. – С. 3–14.
6. Щерба Г.Н., Дьячков Б.А., Нахтигаль Г.П. Жарма-Саурский геотектоноген. – Алма-Ата: Наука, 1976. – 240 с.
7. Коробейников А.Ф. Золото в эндогенных процессах земной коры и мантии // Доклады АН СССР. – 1988. – Т. 299. – № 5. – С. 1233–1237.
8. Коробейников А.Ф. Условия концентрации золота в палеозойских орогенах. – Новосибирск: Ин-т геол. и геофиз. СО АН СССР, 1987. – 177 с.
9. Коробейников А.Ф. Прогнозирование рудоносных площадей и месторождений полезных ископаемых. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 204 с.
10. Коробейников А.Ф. Геология, геохимия, условия образования, прогнозирование и поиски месторождений благородных металлов: итоги исследований // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 2. – С. 102–199.

Поступила 08.10.2010 г.